

# Une minéralogie de l'Anthropocène

Pierre FLUCK

Institut Universitaire de France / Docteur-ès-sciences, géologue et archéologue / Professeur émérite à l'Université de Haute-Alsace

*Cet article vient en complément de « La signature stratigraphique de l'Anthropocène », également sur HAL- Archives ouvertes.*

## Sommaire

1. En guise d'entrée en matière : les minéraux de néoformation dans les anciennes galeries de mines
2. Les minéraux des houillères embrasées
3. Les minéraux de la minéralurgie
- 4... et ceux de la métallurgie
5. Les néoformations dans les scories
6. La spéciation des métaux lourds dans les sols
7. Les objets métalliques dans leur conditionnement archéologique
8. Les néoformations dans ou à la surface des pierres du bâti
9. Une minéralogie des matériaux. Le miracle du potier. Les minéraux du ciment
10. Une minéralogie de la biosphère ?

Conclusions

*Avertissement.* Cet article est rédigé pour être lu aussi bien par les spécialistes que par un plus large public. Il contient cependant de nombreux noms de minéraux. Si ceux-ci résonnent à l'adresse des minéralogistes ou des collectionneurs, ils n'ont peut-être pas beaucoup de signification aux yeux des lecteurs moins avertis. Que ces derniers ne s'effrayent pas, ils trouveront sur la toile d'excellentes notices encyclopédiques comportant la composition chimique, les propriétés cristallographiques et le descriptif de chacune de ces espèces. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas jugé utile de figurer dans cet article davantage de précisions.

*Remerciements.* Je tiens à remercier les minéralogistes avec lesquels j'ai eu le loisir d'entretenir, de longue date, des sommes d'échanges fructueux : mon élève Hubert Bari, Éric Asselborn, Cédric Lheur, François Farges. Et il m'est agréable d'honorer la mémoire de René Weil (1901-1983), mon maître en minéralogie descriptive, et de Jacques Geffroy (1918-1993), élève d'Alfred Lacroix, et mon maître en métallogénie.

## Résumé

Bien des espèces minérales, objets de la recherche ou appréciées des collectionneurs, doivent à l'action des sociétés humaines le fait d'exister. À travers leurs activités, les hommes modifient la surface de la terre – ce sont les entités stratigraphiques de l'Anthropocène – ou en percent l'intérieur, créant ainsi des déséquilibres physico-chimiques à l'échelle d'écosystèmes d'échelles très variables. Après que l'Homme se soit détourné de ses œuvres, la Nature agit seule et fabrique des minéraux. Leur appartenance au catalogue des espèces minérales reconnues fait l'objet de vifs débats entre spécialistes, auxquels nous tentons d'apporter des éléments d'argumentation. Basé sur l'analyse de cas d'école – une ancienne galerie de mine, un terroir de mine de charbon, des

scories de fonderies, des métaux archéologiques enfouis – cet essai tente de montrer à la fois la richesse d'une véritable minéralogie de l'Anthropocène – comprise en tant qu'approche scientifique – et ses limites en direction de « l'artificiel » et de l'infiniment petit.

## 1. En guise d'entrée en matière : les minéraux de néoformation dans les anciennes galeries de mines

*« Ces stalactites se forment par une sorte de végétation... en se ramifiant à mesure qu'elles s'étendent... c'est bien la cristallisation de toute la grotte entière de bout en bout... c'est dans les parties les plus enfoncées dans ces montagnes que se forment le plus de ces concrétions ; on en a la preuve dans d'anciennes galeries, qui ayant été bouchées pendant longtemps, se sont trouvées garnies de stalactites lorsqu'on les a débouchées »<sup>1</sup>*

L'Homme a percé la croûte terrestre de millions de kilomètres de conduits, galeries, puits, chantiers d'exploitation. Dans ces lieux souterrains, les circulations d'eau ont donné naissance à des cristallisations d'espèces minérales. Il en va ainsi des concrétions carbonatées sous forme d'*aragonite* en forme de coraux qui quelquefois encombrant littéralement les vieux travaux [illustr. 1]. Ces néoformations sont la réplique fidèle de celles, totalement issues de l'œuvre de la nature, des environnements des milieux karstiques dans lesquels se côtoient les deux polymorphes du carbonate de calcium. L'*aragonite* paraît se complaire en présence de carbonate de fer, donc au droit des gisements métallifères, d'où le nom d'*Eisenblüte* – fleur de fer – qu'on lui donnait autrefois, comme aux mines de fer de Styrie [illustr. 2]. À cette catégorie des néoformations se rattachent aussi les stalactites de *halite* dans les mines de sel [illustr. 3], tout comme celles d'*epsomite* (un sulfate de magnésium) ou de toutes sortes de sels. Mais aussi de bien d'autres espèces dont beaucoup contiennent des cations métalliques, comme des sulfates de fer ou de cuivre dans les exploitations d'*amas pyriteux* [illustr. 4]. Dans les galeries de Banská Bystrica (Neusohl), en Slovaquie – autrefois la Basse-Hongrie –, ces sels entrent en solution dans les eaux souterraines ; en voyage d'étude sur les lieux (1728), Montesquieu s'est dit impressionné par le spectacle de la cémentation du cuivre à partir de telles solutions<sup>2</sup>.

Un cas d'école se présente à travers les filons métallifères de la fameuse paragenèse<sup>3</sup> à bismuth-cobalt-nickel-arsenic (les « BiCoNi ») répandue dans l'Europe centrale. L'arsenic est fréquent à l'état natif dans ces associations minérales. Exposé au ruissellement des eaux d'infiltration, il entre en solution, chargeant ces eaux d'acide arsénique. Ce dernier réagit contre les gangues carbonatées pour donner naissance à des arsénates calciques, ou qui accueillent d'autres cations. C'est notamment le cas à Sainte-Marie-aux-Mines, dont les espèces minérales néoformées ont causé une véritable effervescence, à la fin des années 1970, au sein du laboratoire de minéralogie de l'Université de Strasbourg [illustr. 5]. Plusieurs « premières descriptions mondiales » y ont été ainsi conduites, donnant lieu à des espèces nouvelles (nous les citons dans l'ordre alphabétique) : *ferrarisite*, *fluckite* [illustr. 6], *giftgrubeite* (décrite en 2016), *mcnearite*, *phaunouxite*, *rauenthalite* [illustr. 7], *sainfeldite*, *weilite*. Ces espèces sont respectivement dédiées à des savants ou à des lieux, ainsi (toujours dans le même ordre) Giovanni Ferraris, Pierre Fluck, la mine Giftgrube,

<sup>1</sup> MONNET A.-G. *Septième voyage*, édité et commenté par P. Fluck, « Voyages, aventures minéralogiques au siècle des Lumières en alsace, Lorraine et Franche-Comté », Éd. du Patrimoine Minier et Do Bentzinger, 2012, p. 367-368

<sup>2</sup> BERTRAND G., BOTS H., BRIZAY F., COURTNEY C.-P., COUTIRIER-HEINRICH C., FLUCK P., MASCOLI-VALLET L., PAPOFF G., POMMIER H., RETAT P., *Montesquieu, Œuvres complètes*, tome 10 *Mes voyages*, sous la direction de Jean Ehrard, Lyon - Paris, ENS Éditions/Classiques Garnier, 2012

<sup>3</sup> Comprenez par *paragenèse* une association minérale.

Elisabeth McNear, le vallon de Phaunoux (désignation française du Rauenthal), le vallon du Rauenthal (désignation allemande du Phaunoux), Paul Sainfeld, René Weil<sup>4</sup>.

Il est un concept qui recueille l'adhésion de nos voisins allemands depuis plusieurs décennies, les Français s'étant montrés plus réservés à en faire usage : celui de **géotope**. Un géotope est un endroit de la géosphère généralement affleurant, qui puisse être considéré comme remarquable par la qualité des informations qu'il procure ou par sa valeur perçue à l'aune du patrimoine, par exemple une carrière creusée dans un *stratotype*, ou bien un affleurement d'orgues volcaniques [illustr. 8]. Ces portions de vieilles galeries dans lesquelles s'est développée ce que certains poètes décrivent comme une « flore souterraine » sont indéniablement d'authentiques géotopes.

Nous noterons bien que, dans l'absolu, de telles espèces peuvent se former dans les cavités naturelles des filons – dont l'intérieur est fréquemment *géodique* –, pour peu que ceux-ci puissent être drainés par les eaux météoriques. L'essentiel cependant de ces cristallisations doivent à l'action de l'homme le fait d'exister : les mineurs en creusant le milieu souterrain ont à la fois rendu possible ou accéléré les circulations d'eau, et offert à la croissance des cristaux les supports et les vides ainsi préparés. Sans bien entendu qu'il y ait eu intention de provoquer un écosystème minéral spécifique. Nous sommes bel et bien en présence de processus naturels qui s'appliquent « à l'aveugle » à des milieux préalablement modifiés, on pourrait presque dire « préparés », par l'Homme.

Mais les minéraux néoformés ne se limitent pas aux cavités créées par les exploitations minières. J'ai eu l'occasion d'étudier en 2006, avec l'équipe de l'égyptologue Claude Traunecker, la tombe 33 de la Nécropole de Thèbes (Padiaménopé) ; les parois des conduits s'y révèlent constellés d'une véritable flore de fines cristallisations salines [illustr. 9]. Ne disposant d'aucun moyen analytique, et dans l'impossibilité de prélever ne serait-ce qu'une aiguille de ces néoformations, je dus me résoudre à des tentatives de déterminations « organoleptiques », qui restent fragiles. Je décrivis ainsi des encroûtements ou efflorescences de *thénardite*  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , des stalactites d'*epsomite*  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , des pustules ou croûtes sombres de *salpêtre*  $\text{KNO}_3$ .<sup>5</sup>

Si l'on assimile ces néoformations à des concrétionnements, c'est-à-dire des minéraux qui se déposent sur un substrat, dans une structure-piège comme une cavité artificielle, alors la tentation est forte d'y rajouter d'autres types de cristallisations. Un ouvrage édité chez Prüss à Strasbourg, intitulé « Gart der Gesundheit » (Jardin de la santé), détaille les animaux, les plantes et les pierres dans une revue encyclopédique présentée dans un ordre alphabétique<sup>6</sup>, en langue vulgaire (l'allemand). Nous avons travaillé sur l'édition de 1509. À l'époque et pour longtemps encore, on ne distinguait pas les roches des minéraux. Le monde des pierres (« von den Steinen ») est un catalogue de 144 entrées. Nous y reviendrons. Parmi celles-ci figure une pierre nommée *tartarus* ou *Weinstein* [illustr. 10] : la chimie moderne nous informe qu'il s'agit du *bitartrate de potassium* qui se dépose en croûtes cristallines dans les tonneaux des viticulteurs. N'est-il pas remarquable

<sup>4</sup> PIERROT R., Contribution à la minéralogie des arsénates calciques et calcomagnésiens naturels, *Bull. Soc. Franç. Minéral. Cristallogr.*, 87, 1964, p. 169-211. BARI H., Minéralogie des filons du Neuenberg à Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin), *Pierres et Terre* 23-24, 1982, p. 3-143 ; MEISSER N., PLÁŠIL J., BRUNSPERGER Th., LHEUR C., ŠKODA R., Giftgrubeite,  $\text{CaMn}_2\text{Ca}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{AsO}_3\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , a new member of the hureaulite group from Sainte-Marie-aux-Mines, Haut Rhin Département, Vosges, France, *Journal of Geosciences* (Czech Geological Society), 64, 2019, p. 73-80 (en ligne <http://www.jgeosci.org/detail/jgeosci.276>).

<sup>5</sup> FLUCK P., La tombe 33 de la nécropole thébaine. Rapport d'expertise géologique. 2006 (diffusion limitée)

<sup>6</sup> Johannes DE CUBA, *Gart der Gesundheit* ou *Ortus sanitatis*, publié à Mayence en 1485 puis à Strasbourg en 1487. Sur la partie consacrée aux pierres, v. FLUCK P., Ressources minérales : explications scientifiques et savoir-faire technique de la Protohistoire à aujourd'hui, in *Les Ressources*, Colloque Institut Universitaire de France, Université de St-Etienne, 2011, p. 81-97.

que dans le vocable *Weinstein* figure le mot « pierre » ? Un produit de composition organique, comme le sont d'ailleurs un certain nombre d'espèces minérales totalement naturelles.

## 2. Les minéraux des houillères embrasées

Le 21 mai 2018, les membres de la *Fédération Patrimoine Minier* arpentèrent les anciennes *haldes* des mines de charbon de Lalaye, en Alsace centrale<sup>7</sup>. Les matériaux qui composent ces tas de schistes et de débris sont pour partie rubéfiés, offrant des teintes orangées qui résultent d'une cuisson sous l'action d'un feu interne. Dans les bassins houillers, en Nord-Pas de Calais, Wallonie, dans la Ruhr, à Commentry, Ronchamp ou encore à Alès et dans l'Aveyron, les grands terrils « brûlent en dedans », leurs parois se révèlent chaudes au toucher par endroits et ces combustions peuvent se prolonger sur plusieurs décennies [illustr. 11]<sup>8</sup>. Les schistes houillers en effet sont chargés de pyrite (un sulfure de fer), qui sous l'action de l'eau de percolation se décompose en sulfate, une réaction qui dégage de la chaleur<sup>9</sup>, encore activée par la fraction volatile libérée par les schistes riches en matière organique. Les ions métalliques divers sont ainsi véhiculés par les gaz brûlants qui circulent dans les fentes ou les joints de ces crassiers, avant de précipiter sous des formes diverses au voisinage de la surface, aux lieux où se dégagent des fumerolles à l'image des gaz d'un petit volcan : *salmiac*, *soufre* et composés soufrés, *alunogène* – un sulfate d'alumine –, *aluns* de potassium ou d'ammonium, *epsomite*, *vivianite*, oxydes et sulfures d'arsenic [illustr. 12 et 13]<sup>10</sup>...

Nous avons évoqué jusqu'ici la surface du terril – quelquefois appelé *schistier* –. Mais voyons ce qui se passe à l'intérieur... plus difficile d'accès ! Ce milieu « hostile » peut être amené à l'affleurement par l'exploitation économique des matériaux qui en constituent le remplissage. Ces excavations dévoilent des roches assez proches de certaines laves, composées de minéraux comme la *tridymite* – une forme de silice de haute température –, l'*osumilite* – un silicate complexe –, la *mullite* – un silicate d'alumine proche de la *sillimanite* – ou du verre, autant de minéraux présents dans la nature au sein des formations volcaniques<sup>11</sup>. Ces espèces minérales, tant celles de la surface que celles du cœur du terril, ont presque toutes ont leur équivalent dans la nature.

Bien des collectionneurs sont friands des néoformations fumerolliennes évoquées plus haut, aux cristaux d'une réelle qualité esthétique. Les articles et les ouvrages de minéralogie les plus sérieux les décrivent le plus naturellement du monde, telle la *Minéralogie de la France* d'Alfred Lacroix, et l'historiographie de la discipline nous fait dénicher maintes publications sur ces espèces<sup>12</sup>.

<sup>7</sup> Des mines exploitées aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles ; FLUCK P., Le puits Mathis réouvert 26 ans après sa fouille, *Annuaire Soc. Hist. Val de Villé*, 2018, p. 168-178.

<sup>8</sup> La société INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) ou d'autres organisations ont mis en œuvre des opérations de *thermographie aéroportée*, qui produisent une image très aboutie des gradients de températures à la surface des terrils en combustion. Ainsi en 2002 les deux terrils jumeaux du puits Couriot, à Saint-Étienne, révèlent-ils par ce moyen une véritable cartographie de leur chaleur de surface.

<sup>9</sup> Quelquefois aussi, des incendies de forêts peuvent se propager aux matériaux constitutifs des terrils.

<sup>10</sup> Ainsi que des sulfures métalliques, *stibine*, *bismuthinite*, *galène*..., ou des sulfates tels la *vivianite*

<sup>11</sup> VIDAL M., MIRIBEL M., DELORME H., BEAL M., Les terrils, vestiges du bassin houiller de la Loire, *Revue des Amis du Musée de la Mine de St-Etienne*, 55, déc. 2016.

<sup>12</sup> MAYENÇON F., Sur quelques produits volatils des mines de houille incendiées, *C. R. Acad. Sci.* 86, 1878, p. 491-493. COLLET A., Notes minéralogiques, *Bull. Soc. Linnéenne Lyon*, 1946, p. 19-23.

V. aussi [https://dossier.univ-st-etienne.fr/dsi/www/tice/geologie/Mineraux\\_region/Partie2-C/terrils.html](https://dossier.univ-st-etienne.fr/dsi/www/tice/geologie/Mineraux_region/Partie2-C/terrils.html)

Voilà donc par excellence une classe de néoformations qui vient s'identifier avec la Minéralogie de l'Anthropocène. Ce défi cependant ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté des curieux de la minéralogie (chercheurs, collectionneurs). On peut être conduit avec quelque légitimité à refuser à ces formations – pourtant d'authentiques espèces minérales telles que celles qui figurent dans toutes les minéralogies descriptives – le droit d'être rangées dans la liste de ce que produit la nature. Au nom de l'*International Mineralogical Association*, Nickel et Grice réfutent, péremptoires, la désignation comme *minéraux* de ces produits : *"It has therefore been decided that, as a general rule, products of combustion are not to be considered as minerals in the future"*.<sup>13</sup> La contradiction suscite de vives joutes sur les forums d'échanges, excellent sujet au demeurant pour des considérations d'ordre épistémologique. Elle pose aussi une question de « frontière ». Ainsi pouvons-nous relever par exemple :

*« Où mettre la frontière entre minéraux secondaires de galeries, minéraux secondaires de scories, minéraux secondaires de houillères embrasées et minéraux secondaires de chapeaux de fer ? Les phénomènes de cristallisation/oxydation/cémentation sont les mêmes. »*

A la réflexion dans de tels lieux, la nature est à l'œuvre avec la même détermination que partout ailleurs, adaptant comme pour les cas d'étude précédents son application à fabriquer des cristaux à des milieux modifiés par l'Homme : l'entassement de stériles en surface s'inscrit dans ces remaniements au titre de réelles unités stratigraphiques, nous avons discuté de ce fait dans notre article « La signature stratigraphique de l'Anthropocène ». Nous reviendrons à propos des déchets de la métallurgie sur ces échanges d'opinions. Le concept d'*Anthropocène*, s'il est admis, est à même d'apporter un éclairage nouveau à cette problématique. On pourrait être conduit à distinguer une « minéralogie noble », celle des pures productions de la Nature, d'une « minéralogie de l'Anthropocène » qui en brise les limites.

Au reste, bien des minéraux doivent à l'action de la biosphère (graminées à *phytolithes* de silice, bactéries, algues, coquillages, vertébrés...) leur existence ; un raisonnement peut-être un peu maniéré pourrait conduire à considérer l'Homme comme une portion de la biosphère, et à ranger ses produits parmi les roches ou les minéraux de l'histoire du Monde. Les « constructions minérales » dues aux animaux ou aux végétaux n'ont cependant pas grand-chose d'intentionnel, ou pour le moins de conscient.

Aussi dans ce qui suit, nous aurions tendance à ne pas mettre l'accent sur les productions volontaires de l'industrie humaine (nous usons ici du concept d'industrie dans sa sémantique traditionnelle), c'est-à-dire les produits finis, mais bien plutôt sur les cristallisations d'espèces minérales *ou assimilées* (comment les nommer autrement ?) *anthropogènes*, c'est-à-dire redevables à l'action des hommes d'exister. Leur génération peut avoir pour cadre les déchets de leurs activités, ou des milieux appropriés aménagés par les sociétés (une maison par exemple), ou encore certains des produits de son industrie, mais sans forcément que leur fabricant en ait pris conscience (par exemple de l'*hatrurite* comme composant des ciments...).

Nous avons encore, sur les forums, relevé la phrase suivante : « *Beau à voir et à photographier, le salmiac – pardon, le chlorure d'ammonium – du terril en combustion de La Ricamarie est un faux, involontaire il est vrai.* ». L'adjectif « involontaire » employé par ce rédacteur dans un forum d'échange d'opinions pèse de toute son importance dans notre réflexion. Il rejoint notre concept de la non-conscience des sociétés humaines d'avoir engendré, de par leur activité fabricante, des produits qui se positionnent au rang des minéraux. On ne prendra pas en considération le

<sup>13</sup> NICKEL E.-H. et GRICE J.-D., The IMA Commission on new minerals and mineral names: procedures and guidelines on mineral nomenclature, *The Canadian Mineralogist* 36, 1998, p. 1-16.

laboratoire qui fabrique des rubis de synthèse, ou encore ces belles formes de sulfate de cuivre ou mille autres produits chimiques élaborés en usines ou par les jeunes curieux de science à partir de leur coffret de croissance des cristaux.

Nous en arrivons à la condition nécessaire et suffisante pour que des espèces minérales puissent être rangées dans les productions de l'Anthropocène : elles doivent leur existence et leur développement à l'action de l'Homme, sans qu'il y ait intention consciente de les produire. Les néoformations dans les anciennes galeries de mines s'inscrivent dans ce cadre. On en trouve d'autres dans les résidus d'activités humaine qui peuvent être assimilés à des unités stratigraphiques, et qui peuvent être considérées comme des entités d'intérêt archéologique. Il en va ainsi des minéraux de la métallurgie.

### 3. Les minéraux de la minéralurgie

On désigne ainsi les processus de préparation des minerais extraits de la mine : le but est de livrer à la fonderie des minerais aussi purifiés que possible (en morceaux, en grains ou sous la forme d'un sable concassé), c'est-à-dire débarrassés de leurs gangues et des fragments de roche encaissante qui les accompagnaient. Traditionnellement, ces établissements étaient appelés laveries de minerais ; dans les temps plus contemporains, on préfère les désigner comme « ateliers de préparation mécanique ». Ces installations ont produit des glacis de déchets quelquefois étendus sur des kilomètres, les *Waschhalden* des Allemands. Ces vestiges d'industrie sont soumis quelquefois à l'érosion qui y découpe des formes étranges – comme aux mines d'argent de Taxco, au Mexique, [illustration 14](#) –, mais surtout aux circulations des eaux de percolation, qui y dissolvent des minéraux en grains encore présents dans ces matériaux sablo-limoneux, et re-précipitent les éléments métalliques dans des combinaisons (ou des spéciations) plus oxydées : voilà un nouvel exemple de néoformations.

Au Brésil dans l'état des Minas Gerais, François Farges décrit les saumures décantées dans un vaste bassin de rétention des déchets de la mine de fer voisine. Il y remarque sur le pourtour des croûtes blanches faites d'un mélange d'*hydrocérusite*, d'*hydrozincite* et d'*hydroxycarbonate de cadmium*<sup>14</sup>. Les deux premiers produits se rencontrent dans la nature sous forme d'espèces minérales.

À Sainte-Marie-aux-Mines, la laverie XV<sup>e</sup> siècle de la mine Sainte-Barbe, qui a laissé un véritable « mille-feuilles » de dépôts de cailloutis fins, de sables, de limons et d'argiles [[illustr. 15](#)], a-t-elle fait l'objet d'une fouille archéologique étalée sur plusieurs années. Le paragraphe qui suit pourra paraître indigeste à l'adresse des non-initiés, il se veut tout simplement évoquer la finesse d'investigation rendue possible par certaines formes d'archéométrie. Des analyses chimiques ont été réalisées feuillet par feuillet en 2012<sup>15</sup>. Les résultats cependant méritent d'être exploités minéralogiquement. Ainsi par exemple, des teneurs faibles en Al et surtout Na excluent la présence d'une fraction feldspathique (donc rocheuse) significative : nous avons affaire à des minerais et des gangues soigneusement triées, séparés de l'encaissant. Les rapports quantitatifs Cu/Pb portent la signature des minerais, la *tétraédrite* (argentifère) et la *galène* (argentifère

<sup>14</sup> Conférence de François Farges, *Minéraux «verts», métaux «verts», eldorados «verts», un éco-mirage ? Le Brésil et ses richesses minérales revues sous le prisme du développement durable*, en ligne sur [http://www.saga-geol.asso.fr/Geologie\\_page\\_conf\\_Bresil.html](http://www.saga-geol.asso.fr/Geologie_page_conf_Bresil.html)

<sup>15</sup> Contribution de E. CAMIZULI, in FLUCK P. et coll, *Mines et métallurgie des non-ferreux en Alsace du Moyen-Age au XVI<sup>e</sup> siècle (Altenberg/Sainte-Marie-aux-Mines, Steinbach)*, *Projet Collectif de Recherches* 2012, décembre 2012, 178 p.

également, mais dans une moindre proportion). Une unité stratigraphique argilo-limoneuse fait exception, elle renferme presque exclusivement du plomb comme métal « utile », ce qui se traduit par une teneur de 1,45 %, non sous forme de galène mais de carbonate (*cérusite*) probablement de néoformation. La présence des *tétraédrites* se manifeste également par les « anomalies » en antimoine et en arsenic. Mais pour ce dernier élément, les teneurs sont telles qu'elles ne s'expliquent que par la présence dans les minerais d'une phase arsénisée importante, *arsenic natif* ou *loellingite*. Le nickel offre des teneurs notoires qui renvoient à la présence présumée de *gersdorffite* ou de *rammelsbergite* en inclusions dans les minerais. Un dernier élément attire notre attention : le phosphore en proportions comparables au soufre, en ordre de grandeur. Il indique la spéciation probable du plomb sous forme de *pyromorphite* de néoformation, en complément de la *cérusite* déjà mentionnée plus haut. De fait, si ces espèces néoformées ne sont pas à proprement parler celles de la minéralogie, elles doivent cependant au fonctionnement de ces ateliers le droit d'exister.

Au final, les analyses chimiques de ces résidus de lavage nous positionnent en possession d'un outil performant pour la connaissance des minerais, mais aussi de leur tri sélectif par le biais du lavage et de leur évolution dans l'altération des « fines » de lavage. Une minéralogie certes ingrate qui s'adresse à des néoformations d'échelle microscopique, mais en même temps ludique à travers les enquêtes – qui quelquefois tiennent de la devinette – qu'elle impose au chercheur.

C'est aussi dans cette catégorie « élargie » que s'intègrent les espèces présentes dans les « boues rouges » issues du traitement des bauxites [illustr. 16] et accumulées dans des bassins de rétention. Ces résidus se composent d'une abondante fraction argileuse mais aussi de minéraux métalliques comme la *cancrinite* – un aluminosilicate de calcium et de sodium – ou l'*hématite*  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mais aussi d'hydroxydes de fer qui retiennent une foule d'autres métaux dont la toxicité fait débat : alumine, titane, sodium, chaux vive, fluorures, chrome, arsenic, mercure...

#### 4... et ceux de la métallurgie

La métallurgie à travers les âges produit des résidus dont la diversité se voit dictée par la gamme étendue des métaux et par les progrès techniques opérés au fil de l'histoire dans les différentes civilisations. Nous axerons notre propos sur les deux exemples de la sidérurgie et des non-ferreux de la triade cuivre-plomb-argent.

Avant l'invention du haut-fourneau, la sidérurgie étale une quantité de déchets bien supérieure à celle du métal produit : ce sont les résidus industriels, généralement accumulés sur des « ferriers » ou « crassiers ». L'essentiel de ces résidus, issus de réactions complexes entre le minerai de fer du bas-fourneau, sa gangue, les additifs qu'on y a ajoutés à la charge et les terres argileuses (« chamotte ») dont on a pu enduire les parois du four, portent le nom de *scories*. Outre que ces scories montrent de remarquables structures de coulées et se révèlent criblées de bulles qui contenaient les gaz, offrant par là un analogue miniaturisé des laves des volcans, leur étude pétrographique livre bien des informations sur les procédés de cette métallurgie [illustr. 17]. On y reconnaît, au microscope binoculaire, ou en lame mince, ou en section polie, à la manière d'un pétrographe, d'authentiques espèces minérales, même si une fraction assez importante de la masse de la scorie revêt une structure vitreuse. Parmi celles-ci prédomine un silicate de fer  $\text{SiO}_4\text{Fe}_2$ , la *fayalite*. On la trouve aussi dans la nature, dans des laves de composition basique ; plus connue sans doute, dans ces mêmes laves, se positionne le silicate double de fer et de magnésium  $\text{SiO}_4(\text{Fe}, \text{Mg})_2$ , appelé *péridot* ou *olivine*, qui forme avec la *fayalite* une série isomorphe.

Avec la « révolution du haut-fourneau »<sup>16</sup>, les praticiens de la sidérurgie perdent moins de matière, le fer ne se réfugie plus aussi massivement dans la composition des scories ; celles-ci sont alors faites d'une masse essentiellement vitreuse et portent le nom de *laitiers*. Dans ces laitiers cependant peuvent apparaître de magnifiques cristallisations de diverses natures et bien observables à l'œil nu.

Infiniment plus complexe, la métallurgie des non-ferreux a laissé des scories de composition très variable, selon les métaux mis en jeu, les additifs apportés dans les fours, comme par exemple des fondants, les gangues des minerais. Pour la triade cuivre-plomb-argent dont les minerais se rencontrent fréquemment en compagnie de gangues à base de carbonate de fer, la *fayalite* est également bien présente dans les scories pour les périodes médiévales. Prenons l'exemple de la fonderie du lieu dit Pfaffenloch, à Ste-Marie-aux-Mines<sup>17</sup>. Gert Goldenberg, au microscope métallographique sur des sections de scories fayalitiques, y a identifié la *nickéline*, la *koutékite*, la *kutinaïte* et la *dyscrasite* (un antimoniure d'argent), en cristallisations microscopiques<sup>18</sup>. A l'exception de la nickéline remplacée par de la *loellingite*, voici l'exacte reproduction de la *paragenèse* – très originale – d'antimoniures et d'arséniures de haute température décrite par François Ruhlmann dans les fentes du granite des Ballons, au lieu dit *Wasserfall* au-dessus du lac d'Alfeld (Vosges du sud)<sup>19</sup>.

L'étude de telles scories répond bien à une problématique archéologique, puisque ces produits font figure d'authentiques *artéfacts*. Mais leur scrutation amène bien d'autres interrogations, comme nous allons le voir. Restreindre les résidus de la métallurgie aux seules scories serait d'ailleurs bien réducteur. Les fours étaient le siège d'un véritable « protocole » de réactions chimiques, générateur de bien des produits qui s'avéraient non-utiles pour le fondeur. Ainsi divers métaux, dont on préférerait se débarrasser, entrent dans la composition de « galettes » de fonte appelée en allemand *Speiss*, ou « résidus métallique », concentrant sous des formes généralement bien cristallisées le fer, le nickel, l'antimoine, l'arsenic, le soufre et même une portion des métaux « utiles » mais qui n'a pu leur être arrachée, en particulier du cuivre sous diverses formes. Pour qui sait les étudier, ces résidus sont des « cartes de visite » des process mis en jeu dans les fours. Déjà Johann Wolfgang von Goethe, fin minéralogiste, avait mis en évidence le vif intérêt que pouvait susciter l'étude des scories, par exemple sur des échantillons que lui avait fourni son ami Herder depuis la fonderie de Freiberg, en 1830<sup>20</sup>. À ce titre, on peut considérer le poète comme un précurseur de Théodore Haupt, le fondateur de l'archéologie des mines et des métaux<sup>21</sup>.

#### Illustr. 17 : carte des crassiers de fonderies

Ainsi, ces scories, résidus métalliques ou encore incrustations de plomb ou le litharge (l'oxyde de plomb) quelquefois déposées inopinément au voisinage des fours participent à une gamme étendue de produits que l'on peut qualifier de « spectre des matériaux archéométallurgiques ». Les fouilles de la fonderie d'argent du Bonhomme<sup>22</sup>, de 1991 à 1994, en ont livré un catalogue significatif<sup>23</sup> : parois de fours, scories de différents types, minerais grillés ou en voie de réduction,

<sup>16</sup> Dès le XII<sup>e</sup> siècle en Scandinavie, aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles en Europe occidentale.

<sup>17</sup> Fouilles archéologiques menées par P. Fluck, 1983, 2006, 2007, 2008.

<sup>18</sup> GOLDENBERG G. et coll, *Metallhüttenwesen im Schwarzwald*, Thorbecke éd., 1996.

<sup>19</sup> RUHLMANN F., Etude métallogénique des minéralisations à Cu-Mo, Cu-As et Cu-Bi des Vosges méridionales : cas particulier de la haute vallée de la Doller, en ligne sur Persée

<sup>20</sup> FLUCK P., Johann-Wolfgang von Goethe et la minéralogie : une passion totale, in *Goethe, le mythe et la science. Regards croisés dans les littératures européennes*, 2019, Colloques en ligne, <https://www.fabula.org/colloques/sommaire6098.php>

<sup>21</sup> HAUPT Th, *Bausteine zur Philosophie der Geschichte des Bergbaues*, Zweite Lieferung, *Die Archäologie und Chronik des Bergbaues*, Leipzig, A. Felix éd., 1866, 76 p.

<sup>22</sup> Qui fonctionna dès les années 1550 pour le traitement des minerais issus des mines de Ste-Marie-aux-Mines

<sup>23</sup> FLUCK P. et FLORSCH N., L'archéologie du feu : les fonderies d'argent du Bonhomme (première partie), *Bull. Société d'Histoire du Canton de Lapoutroie – Val d'Orbey* 15, 1996, p. 9-28



résidus métalliques ou *Speiss*, produits de la coupellation (*litharges*, fragments de coupelles), néoformations plumbeuses (*bindheimite*, *massicot*), métaux... [illustr. 18, 19, 20, 21]

C'est aussi dans cette gamme de produits que se positionnent les oxydes ou sels métalliques produits régulièrement ou « accidentellement » au gueulard, au débouché ou à la périphérie des fours, comme la *fleur de plomb* ou le *tutie* des ingénieurs de la Renaissance [illustr. 22 : cristaux d'oxyde de zinc].

En Slovénie, au voisinage de la mine de mercure d'Ildrija, des dizaines de « places » en forêt abritent des accumulations de tessons de terre cuite [illustr. 23], restes de la distillation du sulfure de mercure. Ces tessons se révèlent incrustés de *cinabre*. En divers lieux d'Europe, les fonderies de non-ferreux nous ont laissé d'impressionnantes ruines. L'intérieur des fours s'y trouve quelquefois conservé, tout incrustés de cristallisations plumbeuses – nous y avons observé de la galène aciculaire !– ou d'autres métaux.

## 5. Les néoformations dans les scories

Tous ces produits décrits plus haut se sont formés très promptement, par cristallisation ou vitrification lors du refroidissement de la charge des fours, ou des coulées qui se réceptionnaient dans les avant-creusets. Il nous reste cependant à relater une autre histoire, qui s'inscrit bien davantage dans le gradualisme ou la lenteur de bien des productions géologiques. La forme peut-être la plus subtile de l'*Anthropocène* !

En effet les scories, ces laves en miniature, contiennent très systématiquement des bulles, milieu rêvé pour que toute une gamme de minéraux en arrive à trouver l'endroit hospitalier pour y exprimer leur présence : voilà donc à nouveau d'authentiques *néoformations* ! Ces fines cristallisations n'échappèrent pas à l'observation, ou à la loupe, de certains pétrographes ou minéralogistes du XIX<sup>e</sup> siècle. On les rencontre en relative abondance dans les scories, en partie baignées par le battement des marées, des fonderies athéniennes du Laurium. En ces lieux, le sel marin réagit avec ces matériaux fortement plumbeux pour y former des chlorures, comme la *laurionite*  $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$  décrite par un minéralogiste autrichien, R. Koechlin<sup>24</sup>. Stanislas Goldsztaub, élève d'Alfred Lacroix et qui fut mon professeur de minéralogie, en précisa la structure<sup>25</sup>. Cas d'école dans l'histoire de la discipline, la *laurionite* fut découverte par la suite en milieu naturel<sup>26</sup>.

L'étude de tels matériaux apporte un champ nouveau à la minéralogie, déjà défriché en 1896 par le minéralogiste français Alfred Lacroix sur ces scories antiques du Laurium<sup>27</sup>. En 1908, L. Michel décrit des cristaux dans les scories de Poullaouen, en Bretagne<sup>28</sup>. Pour les scories de la fonderie de plomb et d'argent de Vialas (Lozère), du XIX<sup>e</sup> siècle, Cédric Lheur a pu déterminer 45 espèces minérales néoformées [illustr. 24 et 25]<sup>29</sup>, 27 pour Poullaouen<sup>30</sup> ! Kolitsch et al. en décrivent 110

<sup>24</sup> KOEHLIN R., Über Phosgenit und ein muthmasslich neues Mineral vom Laurion. *Annalen des K.K. Naturhistorischen Hofmuseums*, 1887, p. 185-190.

<sup>25</sup> GOLDSZTAUB S. (1937) Structure cristalline de la laurionite. *Comptes rendus Acad. Sci. Paris*, 204, 1937, p. 702-703.

<sup>26</sup> RUSSELL A. et HUTCHINSON A., On laurionite and associated minerals from Cornwall. *Mineralogical Magazine*, vol. 21, 116, 1928, p. 221-228.

<sup>27</sup> Et dans des publications ultérieure, p. ex. LACROIX A. et DE SCHULTEN A., Note sur les minéraux plombifères des scories athéniennes du Laurion, *Bull. Soc. Française de Minéralogie*, 1908

<sup>28</sup> MICHEL L., Sur la présence de quelques minéraux dans les scories anciennes de la fonderie de plomb de Poullaouen (Finistère), *Bull. Soc. Franç. de Minéralogie*, 31, 1908, p. 274-275 (en ligne sur *Gallica*)

<sup>29</sup> LHEUR C., *La mine de Vialas en Lozère*, éd. d'auteur, 1997, 190 p.

pour le site de Maria Weitschach, en face de Hüttenberg, en Carinthie <sup>31</sup> ! Le Harz en a fourni énormément <sup>32</sup>. Si un pan d'étude s'ouvre ainsi, qui s'étend même à la science des matériaux, ces cristallisations, intelligemment interrogées, n'en constituent pas moins aussi un objet certes encore peu exploité pour affiner l'approche des procédés de la métallurgie (métaux présents, additifs ou fondants...), et donc apporter un éclairage à l'archéologie des techniques.

On peut lire encore sur un forum : « *Ces "minéraux" de scories mériteraient d'être répertoriés et classifiés, certains amateurs se sont spécialisés dans leur récolte et il n'y a aucune raison de rejeter ce domaine aussi intéressant et varié que celui des minéraux "naturels" que l'on retrouve d'ailleurs dans les scories. Leur donner un nom en attendant de les retrouver en milieu naturel ne me paraît pas choquant...* »

Si elle régale les amateurs de « micro-mounts », cette minéralogie des scories et autres résidus de fonderie, à travers ses espèces primaires et surtout (pour les néoformations dans les bulles) secondaires, se positionne également à l'origine de vifs débats sur les réseaux, des prises de position qu'on peut tout à fait comprendre. Ainsi a-t-on pu lire :

« *Voyons, un peu de respect pour vos collègues... Ici on traite de minéraux et non d'artéfacts issus des poubelles de l'industrie. L'International Mineralogical Association exclut inconditionnellement tout "produit anthropique" tel que ces produits chimiques colorés, à formes cristallines avérées, que l'on peut trouver dans les bulles des scories, vulgaires déchets de l'industrie chimique ou métallurgique voire minéralurgique.*

Les détracteurs d'une « minéralogie des scories » remplacent les noms des espèces minérales par la désignation des composés chimiques, ou les accompagnent de la mention « *synthétique* ». En effet l'IMA, par la voix de E.-H. Nickel <sup>33</sup>, exclut du champ de la minéralogie les espèces qui n'ont pas été trouvées également en contexte naturel ; c'est le cas de plusieurs espèces du Laurion, qui restent cependant homologuées en raison de l'ancienneté de leur publication <sup>34</sup>. Le substantif *synthèse* ou l'adjectif *synthétique* ne me paraît pas soutenable, il sous-tend une volonté humaine d'élaborer un produit. Dans le cas présent, nous observons ou découvrons la nature à l'œuvre dans un écosystème *anthropogène*, de petite (une scorie !) ou grande dimension (un terril embrasé) <sup>35</sup>. Aussi, si nous admettons l'idée que l'Homme soit créateur d'entités stratigraphiques qui se superposent ou s'intercalent (une halde recouverte par les colluvions de pentes...) dans celles d'origine géologique, nous devons adopter l'idée d'une minéralogie de l'Anthropocène.

Il est clair qu'un refus d'admettre au rang de minéraux les néoformations dans les scories entraîne tous les autres types d'occurrences (houillères embrasées, anciennes galeries de mines) dans cette mise au rebut. Nous avons pu lire sur le net « *...il faudra être plus strict et dire à l'IMA de virer tous les minéraux secondaires formés suite à des actions anthropiques (Sainte Marie aux mines, Cap Garonne... en sont des exemples !), car pourquoi s'arrêter aux minéraux de scories métallurgiques ?* »

<sup>30</sup> LHEUR C., La fonderie de Poullaouen et les minéraux de scories: la redécouverte d'un « gîte », *Le Règne Minéral* H.-S. 18, 2012, p. 81-97.

<sup>31</sup> KOLITSCH U. et al., Die Mineralogie der weltweit einzigartigen Schlacken von Waitschach, Kärnten *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien. Serie A für Mineralogie und Petrographie, Geologie und Paläontologie, Anthropologie und Prähistorie*, 115, 2013, pp. 19-87

<sup>32</sup> <http://www.vfm-g-freiburg.de/index.php/fotogalerie/schlackenmineralien>

<sup>33</sup> NICKEL E.-H., Definition of a mineral. *Canad. Mineral.* 33, p. 689-690

<sup>34</sup> De fait, leur conservation comme minéraux est tolérée pour les espèces décrites avant 1995.

<sup>35</sup> Dans mes publications passées, je soutenais l'idée d'une *écologie minérale*, ainsi dans FLUCK P., Vue nouvelle sur la géologie des Vosges moyennes d'Alsace et son apport pour l'histoire de la chaîne varisque. *Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar*, 57, 1978/80, p. 3-76.

*« À noter que l'IMA a bien accepté au départ des minéraux de scories en essayant de définir certaines conditions d'ancienneté, d'absence de création intentionnelle... ce sont les déchets récents, plus complexes qui ont dû inciter à abandonner leur validation... Les minéraux du Laurion et de terrils embrasés ont été acceptés »*

Nous conviendrons que là, l'IMA se tromperait, ou a tenté de se justifier derrière une carapace historico-archéologique fallacieuse. Car pourquoi les déchets de « l'ère industrielle » seraient-ils moins porteurs d'informations ? Que deviendront-ils dans quelques centaines d'années ? Nous rejoignons sur ce point la problématique, récurrente s'il en est, des frontières que les tenants de tel ou tel champ d'investigation s'efforcent, artificiellement, de tracer dans leur univers d'étude potentiel. Nous avons encore lu sur un forum cette phrase très pertinente :

*« Où mettre la frontière entre minéraux secondaires de galeries, minéraux secondaires de scories, minéraux secondaires de houillères embrasées et minéraux secondaires de chapeaux de fer ? Les phénomènes de cristallisation/oxydation/cémentation sont les mêmes. »*

## 6. La spéciation des métaux lourds dans les sols

Le cas de figure de la spéciation des métaux dans les sols transcende les précédents, en particulier parce que ce processus déborde dans l'espace les lieux d'accumulation de déchets (halles ou ferriers), une colonisation de l'environnement favorisée par les agents météoriques (vents, circulations d'eau). En leur proximité immédiate, les mines s'accompagnent des rejets de stériles (les halles), qui contiennent fréquemment une certaine quantité de minerais. Ces stériles se voient lessivés par les eaux de pluies. Celles-ci possèdent le pouvoir d'hydrolyser en partie ces minerais ; les métaux lourds s'en trouveront véhiculés puis redéposés en aval, à plus ou moins grande distance, sous des combinaisons chimiques nouvelles fréquemment cristallisées : on dit « spéciations », ce sont des espèces que nous pouvons considérer, pour certaines<sup>36</sup>, comme minérales. Leur adhésion au domaine de la minéralogie est conditionnée par leur identification comme espèce répertoriée, mais aussi par leur délimitation dans le champ de l'infiniment petit : des nanomatériaux peuvent-ils être assimilables à des minéraux ?<sup>37</sup> D'aucuns s'y opposent, au prétexte que sur d'aussi petits édifices, les propriétés physiques ne peuvent plus être perçues ni mesurées.

Il en va de même pour les contaminations à partir des crassiers à scories, comme celui de l'Escalette, au sud de Marseille [illustr. 26], propulsé sur le devant de la scène par une émission de télévision alarmiste. Hors des emprises des usines en ruine, le crassier principal occupe 0,55 hectares (à comparer aux 17 hectares de celui de Rio Tinto, illustr. 27). Des dossiers très fouillés ont été produits sur ce site par les autorités sanitaires des Bouches-du-Rhône. Malgré cela, nous restons dans un état de grande indigence vis-à-vis des sources réelles de contamination, contemporaines du fonctionnement de la fonderie (seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et première moitié du XX<sup>e</sup>) : comment fonctionnait cette fonderie, combien de fours comportait-elle, où étaient-ils localisés précisément, quelles quantités de matières premières ont-ils traitées, par

<sup>36</sup> Nous rencontrons aussi des composés organiques, qui se forment par réaction, fréquemment avec la complicité des bactéries, avec la matière organique des sols ou les tissus vivants, tels les composés du mercure sous forme de méthyl-mercure dans les parages des installations d'amalgamation des mines d'or.

<sup>37</sup> NICKEL E.-H. et GRICE J.-D., The IMA Commission on new minerals and mineral names: procedures and guidelines on mineral nomenclature, *The Canadian Mineralogist* 36, 1998, p. 1-16.

quels procédés, de quand datent les différentes concentrations de déchets, autant de questions déterminantes quant à l'évolution dans le temps de la spéciation des métaux. Relever des teneurs anormales en arsenic, antimoine et plomb de part et d'autre de la cheminée rampante de 350 mètres n'offre rien d'étonnant, si ce n'est que, à nouveau, nous nous retrouvons en présence de la minéralogie des *néoformations* (comme la *mimétite*, un arséniate de plomb dont la présence ne surprend pas).

Dans les positions de fonds de vallées, il est fréquent que des composés métalliques se déposent avec leur cortège de silts et d'argiles à la manière de sédiments, quelquefois sous forme de lamines dans des « millefeuilles » de dépôts, les ions étant véhiculés par le réseau hydrographique venu, en amont, lessiver ou affouiller des lieux de stockage de déchets (résidus de laveries, de fonderies, d'usines chimiques).

### Conclusion partielle

Ces minéraux de la minéralurgie, de la métallurgie, ou tout particulièrement ceux issus de la migration des métaux diffusant à partir des zones de production, font de ces lieux de véritables laboratoires naturels d'étude de la *spéciation* des métaux. Le paramètre « temps » joue dans ces réactions ou dans ces dépôts un rôle prééminent, aussi pouvons-nous considérer ces milieux, en même temps, comme des enregistreurs de l'évolution dans la durée de la matière néoformée à travers l'Anthropocène. Ces recherches s'inscrivent dans une démarche de science appliquée, elles nous permettent de décrire, comprendre ou prédire les conséquences de ces charges en métaux lourds pour l'évolution de la biosphère, et ses répercussions sur les états de santé des populations.

## 7. Les objets métalliques dans leur conditionnement archéologique

Dans son milieu archéologique, l'objet métallique change de forme, de couleur, de densité, au point quelquefois d'en devenir méconnaissable. Il entre alors en équilibre avec les matériaux qui l'entourent, ou au contraire participe avec ces derniers, comme partenaire, à des échanges variés que nous appelons réactions chimiques.

Prenons le cas des haches armoricaines en cuivre. Les analyses des divers produits d'oxydation de ces objets ont conduit à identifier un certain nombre de composants que caractérisent une composition chimique donnée, et un état cristallin : en minéralogie, nous appelons cela des espèces minérales. Les cristaux étant petits et peu visibles, et fréquemment sans forme propre, leur détermination se fait le plus commodément à l'aide de la méthode dite « diffraction des rayons X ». Ainsi dans nos outils (les haches en cuivre) coexistent, diversement représentés, la *cuprite*  $\text{Cu}_2\text{O}$ , la *ténorite*  $\text{CuO}$ , la *malachite* et l'*azurite* (des carbonates), la *covellite*, la *chalcocite* et la *bornite* (des sulfures), la *langite* et la *brochantite* (des sulfates), ainsi que des chlorures, l'*atacamite* (qui évoque les fabuleux gisements de cuivre du Chili !)  $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{CuO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  et la *natrochalcite*  $\text{CuCl}_2$  (instable, de couleur blanchâtre, grise dans les coupes)<sup>38</sup>. Rajoutez à cette panoplie d'espèces la *chalconatronite*  $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2$  déterminée également sur des statuettes égyptiennes. Les haches armoricaines au plomb ne sont pas en reste ; on y a déterminé  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{PbCO}_3$ ,  $\text{PbO}_2$ . Ces produits ont pour noms, dans le domaine de la minéralogie, *massicot*, *cotunnite*, *anglésite*, *cérusite*, *plattnérite*.

<sup>38</sup> MOHEN J.-P., *Métallurgie préhistorique. Introduction à la paléométallurgie*. Masson, 1990

Nous constatons ainsi que l'objet métallique, une fois enfoui, retourne à des états proches des minerais de ces métaux, tels qu'on les observe dans les zones d'oxydation ou de cémentation des gisements. Ce constat conduit à imaginer le *cycle du métal*, partant du minerai (stable), allant au lingot (par la métallurgie de réduction), à l'objet fini (par la métallurgie de transformation), instable, qui trouve ensuite son positionnement archéologique, favorable à sa transformation en espèces minérales qui « reproduisent » les minerais du départ. Cette analogie n'est pas sans intérêt. Nos objets sont d'authentiques d'artéfacts, mais, à l'inverse des scories, des « artéfacts-produits », pas des « artéfacts-déchets ». L'action des agents naturels – percolations d'eau dans les unités stratigraphiques archéologiques – et divers paramètres (débit, PH, nature de l'environnement des objets...) crée cette gamme d'*oxydés* qui sont tout à fait comparables aux cristaux dans les scories. À nouveau, la Nature est à l'œuvre sur un microcosme anthropogène.

## 8. Les néoformations dans ou à la surface des pierres du bâti

Dans notre première rubrique, nous assistions à l'aménagement par les sociétés humaines de cavités souterraines que la Nature a envahie de ses cristallisations. Ce huitième paragraphe aborde le rôle du bâti comme hôte, ou « structure-piège », d'espèces minérales de l'Anthropocène.

Le *salpêtre* ou « sel de pierre »<sup>39</sup> forme des croûtes faites de cristaux fibreux, dans les caves ou celliers, les étables ou les écuries, en milieu humide. La présence d'eau chargée d'ions ammonium (fournis plus particulièrement par l'urine des animaux) permet une « ascension » de ces solutés par capillarité le long des murs. Oxydés par des bactéries nitrifiantes, ces ions *ammonium* donnent naissance à un sel, un nitrate de potassium appelé *nitre* ou *salpêtre*. On notera que le *nitre* se rencontre naturellement dans certaines régions arides du globe, dans des sols chargés de matière organique. Très recherché autrefois comme matière première de la poudre, le salpêtre servait également pour les salaisons. C'est dire l'importance du métier de salpêtrier. Certains le récoltaient... là où il se trouvait, dans les lieux que nous venons d'évoquer. D'autres étaient affairés dans une véritable industrie du salpêtre, produit artificiellement en ateliers, et à ce titre échappant au domaine de la minéralogie.

En règle plus générale, les circulations d'eau par capillarité dans les roches poreuses (grès, calcaires tuffeux), sont à l'origine de cristallisations de sulfates, ou de carbonates, ou de chlorures, quelquefois avec la complicité de microorganismes, ou la pollution de l'air aidant : *gypse*, *thénardite*  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , *mirabilite*<sup>40</sup> ou sel de Glauber  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ <sup>41</sup>, *natron*  $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ... L'illustration 28 est un tableau aidant à mémoriser les compositions des principaux types de sels.

Il est toujours remarquable de relever que certaines espèces minérales se forment indifféremment dans la nature ou dans « la nature modifiée par l'Homme », ce qui restreint le clivage entre la minéralogie des formations géologiques et celle de l'Anthropocène. Somme toute n'observons-nous dans les exemples précédents que la détermination de la nature (évidemment régie par les processus physico-chimiques) à répondre aux sollicitations de son environnement. Il se trouve que

<sup>39</sup> D'ALEMBERT, DIDEROT, *L'Encyclopédie*, tome 14, 1751, p. 577-580.

<sup>40</sup> Également décrite par René Weil comme néoformation dans une galerie de la mine Gabe-Gottes à Ste-Marie-aux-Mines, qui paraissait alors « comme tapissée de neige ».

<sup>41</sup> JEANNETTE D. et coll., La conservation de la pierre monumentale en France, CNRS éd., 1992, 240 p. ; BROMBLET Ph., Memento sur les altérations de la pierre, <http://pierresud.brgm.fr>. On trouvera beaucoup d'autres références sur la toile.

les sels précités se trouvent *aussi* produits naturellement, dans des lagunes, lacs salés, lacs temporaires ou dans les dépôts résiduels issus de leur évaporation : mer d'Aral et mer Caspienne, Vallée de la Mort en Californie, Grand Lac Salé et bien d'autres lieux, ou dans les dépressions sahariennes pour le natron principalement (la « soude d'Égypte »)...

Dans la famille des carbonates, la *calcite* ou l'*aragonite* jouent un rôle important dans les déplacements/re-précipitations de matière, généralement liés à des eaux ruisselantes. Ainsi, l'aqueduc de Nîmes dut-il être progressivement abandonné à la suite de la perte de son débit, consécutive à la cristallisation, dans sa lumière intérieure, d'un épais concrétionnement de calcite<sup>42</sup>.

## 9. Une minéralogie des matériaux ?

**Le miracle du potier.** Dans le four du potier, ou de la tuilerie industrielle, les minéraux se font et se défont, à partir d'une composition initiale qui englobe la silice, éventuellement des feldspaths ou des micas, et les minéraux des argiles qui forment la matière essentielle de la « terre ». Une étrange mutation se produit au cours de la cuisson, qui transforme ces matériaux plastiques et déformables en une céramique dure et durable. On pressent que l'étude des minéraux néoformés dans le four nous permettra de comprendre ce « miracle du potier » resté si longtemps dans l'Histoire inexpliqué. L'étude pionnière d'une population d'amphores par Véronique Walter<sup>43</sup> a ainsi montré, dans la masse du tesson, la présence de *sanidine*, de *diopside*, de *gehlénite*, de *wollastonite* et d'*hématite*. Ces espèces bien connues des minéralogistes y compris des collectionneurs peuvent être réparties entre des minéraux primaires (hérités, présents dans la pâte ou dans le « dégraissant »), des espèces apparues durant la cuisson, enfin celles formées secondairement. Mieux : les domaines de stabilité de ces minéraux en fonction du champ des températures ont pu être précisés par l'expérimentation ; la présence concomitante de plusieurs espèces permet d'évaluer avec une certaine approximation la **température de cuisson**. Encore faut-il user de cette valeur avec précaution : les réajustements minéralogiques, au sein de la matière et dans un « climat » déterminé (température, composition générale du matériau, air ambiant, confinement...), exigent du temps, ce dernier paramètre revêt une importance qu'on ne saurait sous-estimer.

L'analogie entre la cuisson dans le four du potier et, dans la nature, le métamorphisme thermique d'une série schisteuse au contact d'un granite est tout à fait frappante. Terme ultime du métamorphisme de contact, la *cornéenne* à structure semblable à de la corne peut se comparer à certaines céramiques réfractaires. L'Homme reproduit ce que la Nature fabrique dans ses propres « laboratoires » ! Certes, les céramiques sont des artefacts manufacturés. Cependant même si le potier n'est pas conscient de la nature des minéraux qu'il vient de fabriquer, ces derniers ne peuvent revendiquer l'appartenance aux espèces minérales naturelles. En revanche, la minéralogie, comprise comme une science usant d'une méthode d'investigation éprouvée, peut être légitimement conduite à s'intéresser à ces produits, et à les désigner de la même appellation que les analogues fournis par la nature.

<sup>42</sup> GUENDON J.-L., LEVEAU Ph., Dépôts carbonatés et fonctionnement des aqueducs romains : Le bassin amont du vallon des Arcs sur l'aqueduc d'Arles (Bouches-du-Rhône), Gallia éd., 2005, accessible en ligne sur *Persée*

<sup>43</sup> WALTER V., *Étude pétrographique, minéralogique et géochimique d'amphores gauloises découvertes dans le Nord-Est de la France, contribution à l'étude des matériaux, des technologies et des provenances*, Thèse de Doctorat en Sciences de l'Antiquité, Université de Strasbourg, 1988.

Johann Wolfgang von Goethe déjà pressentait tout l'intérêt qu'il y avait à comprendre la minéralogie des céramiques. Il espérait même, en élevant la température des fours d'une manufacture de porcelaine, rejoindre les phénomènes de la fusion des roches<sup>44</sup>.

Certains des constituants minéralogiques de la céramique, qui se font très discrets dans sa pétrographie, se révèlent pourtant d'une réelle importance pour la recherche : nous faisons allusion aux oxydes de fer produits par la cuisson (la couleur rouge de la brique n'échappe à personne !) ; de très fines particules de *magnétite*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  « captent » ainsi le champ magnétique terrestre, et le « fossilisent » en quelque sorte au moment du refroidissement de la matière encore dans le four. Les géophysiciens utilisent cette propriété pour dater le fonctionnement du four, par la méthode dite de l'*archéomagnétisme*.

Il est intéressant, à ce propos, de revenir sur l'encyclopédie « Gart der Gesundheit » (Jardin de la santé) des toutes premières années du XVI<sup>e</sup> siècle. Les tuiles (*tegula*) y figurent au titre des pierres, tout comme la *terra sigillata*.

**Les minéraux du ciment.** Le ciment nous introduit dans un autre cas d'école qui offre quelques ressemblances avec le précédent. Nous le livrons pour alimenter la réflexion. Matériau de construction par excellence, il est fabriqué à partir de trois matières premières principales : le calcaire, l'argile (composée de minéraux alumineux) et le sable (composé de silice)[*illustr. 29*]. Évidemment les éléments se recomposent entre eux au moment de la cuisson ; ils forment des cristaux microscopiques « découverts » par les chercheurs qui étudièrent la pétrographie du matériau comme on étudierait une roche ; ainsi la silice se combine-t-elle avec le calcium pour former un silicate de chaux  $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$  appelé *alite*, un composé qui existe dans la nature sous la forme d'une espèce minérale appelée *hatrurite*, découverte en 1977 dans un contexte de métamorphisme de contact. Cette composition est d'ailleurs assez proche de la *wollastonite*  $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$  un peu moins calcique mais beaucoup plus connue des minéralogistes. Mais le ciment héberge aussi de la *calcite*, du *gypse*, du *périclase*  $\text{MgO}$  – un minéral bien connu dans la nature – et des minéraux alumineux – notamment un aluminat de calcium – qui logent l'aluminium initialement fourni par la fraction argileuse de la matière première. Le *mercure* intervient dans le processus de la *klinkérisation*. Enfin la *portlandite*  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , une sorte de « chaux éteinte » également décrite dans la nature, se présente comme un des produits essentiels de l'altération des ciments !

À l'opposé des céramiques, le ciment n'a pas vraiment d'équivalent « roche » dans la nature, à l'exception peut-être de certaines cornéennes calcsilicatées. Il n'en reste pas moins que l'Homme a su créer par cette industrie des matériaux qui peuvent être assimilés à une « roche de l'Anthropocène », sans même au départ posséder la conscience que ces matériaux hébergeront d'authentiques minéraux ; parmi ceux-ci, certains partagent avec des composés naturels cette identité, d'autres n'ont peut-être pas d'équivalent dans la nature. Ce sont ces considérations qui nous conduisent à admettre l'entrée de ces entités dans le domaine embrassé par la recherche en minéralogie.

## 10. Une minéralogie de la biosphère ?

<sup>44</sup> FLUCK P., Johann-Wolfgang von Goethe et la minéralogie : une passion totale, in *Goethe, le mythe et la science. Regards croisés dans les littératures européennes*, 2019, Colloques en ligne, <https://www.fabula.org/colloques/sommaire6098.php>

Le « Gart der Gesundheit » regorge de descriptions de pierres qui se forment à l'intérieur des yeux ou du crâne de certains animaux – dans la tête des crapauds, par exemple –, qui constituent la matière des coquillages ou de leur nacre, des perles ou des éponges. Il décrit le succin comme étant une gomme qui s'écoule des arbres. Rajoutez à cela les phytolithes des céréales ou les sels minéraux concentrés par les plantes. Toute une minéralogie de la biosphère... mais cela constitue un autre propos ! Ces espèces biogéniques ont leurs équivalents dans la nature. Nickel et Grice, pour l'IMA, s'expriment ainsi<sup>45</sup> : *“Some biogenic substances, such as hydroxylapatite in teeth, whewellite in urinary calculi<sup>46</sup> or aragonite in the shells of molluscs, also exist as minerals formed by geochemical processes, and therefore are regarded as valid minerals.”* La *whewellite*, par exemple, a été découverte et décrite dans la paragenèse cupro-argentifère du filon de la mine Sylvestre, en Alsace, par son directeur d'exploitation – et en même temps éminent minéralogiste – Henri Ungemach<sup>47</sup>.

## Conclusions

Nous pourrions presque conclure de tout cela que l'Anthropocène est rempli de minéraux ! À travers ces différents cas d'étude, nous venons de passer en revue un certain nombre de milieux que caractérise la présence d'espèces minéralogiques ; les unes ont été obtenues artificiellement sans que leurs créateurs en aient eu la conscience, d'autres furent fabriquées par la nature dans des sites-hôtes mis en place intentionnellement par l'homme, ou pas.

Prise dans une perspective analytique, la question s'avère complexe. En premier lieu interviennent les lieux de naissance de telles espèces. Ceux-ci peuvent être

- des structures-pièges ou des sites d'hébergement aménagés par l'homme (mines, maisons, tombes souterraines...) ; une galerie de mine est une entité stratigraphique négative livrée à l'action des éléments !
- des champs d'épandages ou des tas de déchets ; un terroir est une unité stratigraphique anthropique dont l'intérieur est livré à la nature ; chacun des déchets d'un *ferrier*, chaque objet métallique enfoui, peuvent être considérés comme des artefacts à leur tour livrés à une nature qui reprend ses droits.
- le territoire lui-même (pour les migrations de métaux dans les formations superficielles).
- des usines (pour le cas des fours à céramique ou à ciment) qui produisent des matériaux artificiels certes, mais dont les espèces constituantes peuvent intéresser le minéralogiste dans sa démarche autant que le chercheur en sciences des matériaux, tout comme elles suscitent d'intéressantes réflexions épistémologiques.

À l'exception des usines, ces types de sites peuvent être assimilés à de véritables **écosystèmes** minéraux, dans lesquels quelquefois la biosphère interfère. De tels écosystèmes ont pris place dans le temps de l'Anthropocène, après que l'Homme se soit détourné des modifications paysagères qu'il venait de produire (creusements, halles, sédiments, enfouissement des objets qui acquièrent par là-même un statut archéologique...). Dès cet instant, la Nature agit seule et

<sup>45</sup> NICKEL E.-H. et GRICE J.-D., op. cit.

<sup>46</sup> À noter que la *whewellite* a été découverte et décrite par UNGEMACH dans la paragenèse cupro-argentifère du filon de la mine Sylvestre, à Urbeis (Bas-Rhin)

<sup>47</sup> UNGEMACH H., Notes sur les cristaux de whewellite rencontrés dans un filon métallifère alsacien, *Bull. Soc. Franç. Minéral.*, 32, 1909, p. 20-34.



fabrique... des minéraux. Les lois physico-chimiques sont universelles et s'appliquent en tous milieux !

Au-delà de ces considérations sur la « génération » de ces espèces, il convient encore de faire une partition entre les réalisations propres aux forces de la Nature (celles dont il est question au paragraphe précédent), et celles inconsciemment fabriquées de main d'homme. Nous avons exclu de ces considérations les productions intentionnelles d'espèces cristallisées, comme le sucre candi – qui fait l'objet d'une rubrique dans la section « pierres » du « Gart der Gesundheit »<sup>48</sup> –, ou encore le carbure de calcium des usines de Bellegarde ou d'Allasac à l'odeur si familière aux spéléologues. Ou même les cristaux d'alun de potassium que font « pousser » les enfants à partir d'un kit que leurs parents ont déniché dans un rayon de jouets ; là, la croissance du cristal est réalisée sciemment ! Même si on rencontre dans les bourses de minéraux des plaques épaisses de silicium joliment cristallisé, obtenu industriellement dans des entreprises américaines.

Toujours au titre des conclusions, nous pouvons nous questionner de savoir si l'Homme « fabrique » lui-même des formations géologiques, au sens des sciences de la Terre ? La réponse est non dans l'absolu, ce qu'il apporte occupe certes le volume d'entités stratigraphiques, mais leur contenu n'est pas reconnu par la pétrographie, à quelques exceptions près<sup>49</sup> ; en effet, le ciment, le béton, la terre sont des roches ignées fabriquées par l'homme (produites par l'action du feu), tout comme les résidus de lavage des minerais, ou les sédiments modifiés du fait de pollutions accidentelles pourraient être classés au rang des roches sédimentaires. Si la question en revanche embrasse la création par les sociétés humaines de minéraux, la réponse doit être « oui », les espèces qu'il génère, avec ou sans la complicité de la Nature, ne se distinguent en rien de celles issues des laboratoires de la nature. Cet article tente de l'argumenter !

## Légendes des illustrations

Illust 1 – aragonite coralloïde dans une ancienne galerie de mine de l'Altenberg, à Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck

Illust 2 – dans une miniature, statuette de mineur en compagnie d'aragonite coralloïde, dans une vitrine du musée d'Eisenerz, en Styrie. Photo P. Fluck

Illust 3 – concrétionnement de sel dans les installations souterraines d'une mine en Roumanie. Photo P. Fluck

Illust 4 – concrétionnement contenant du sulfate de fer dans le puits de l'Engin, à Grandfontaine (Alsace). Photo H. Bari

Illust 5 – un arséniate : picropharmacolite in situ dans une ancienne galerie de mine du Neuenberg, à Ste-Marie-aux-Mines (remarquer l'insecte pris dans les aiguilles du minéral). Photo P. Fluck

<sup>48</sup> Il décrit aussi une pierre appelée *mumia*, composée de myrrhe d'aloé et de baume « qui contrarient la mort » dont on embaumait les momies.

<sup>49</sup> V. « La signature stratigraphique de l'Anthropocène » ; on peut citer les sédiments de lavage des minerais, ou la sédimentation au fond des lacs de barrage...

Illust 6 – fluckite sur le quartz à cuivre gris, 5 x 2 cm, mine Giftgrube, Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck

Illust 7 – rauenthalite, 5,5 x 3 cm, Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck

Illust 8 – un géotope : orgues dans les laves rhyolitiques, réserve naturelle de Scandola (Corse). Photo P. Fluck

Illust 9 – la paroi de la salle la plus profonde de la tombe de Padiaménopé, nécropole de Thèbes. Photo P. Fluck

Illust 10 – tartrate de potassium ou *Pierre de vin*. Photo P. Fluck

Illust 11 – terril occidental du puits Couriot, à St-Étienne. Remarquer les parties brûlées. Photo P. Fluck

Illust 12 – réalgar (sulfure d'arsenic) en provenance d'un terril de la région de St-Étienne, 4,5 x 3 cm. Photo P. Fluck

Illust 13 – arsénolite (oxyde d'arsenic) en provenance d'un terril de la région de St-Étienne, 6 x 4 cm. Photo P. Fluck

Illust 14 – phénomènes d'érosion dans une halde de résidus de lavages des mines d'argent de Taxco (Mexique). Photo P. Fluck

Illust 15 – le « mille-feuilles » stratifié des résidus de la laverie de la mine Ste-Barbe (fin du XV<sup>e</sup> siècle), à l'Altenberg (Ste-Marie-aux-Mines). Coupe stratigraphique réalisée à l'occasion d'une fouille archéologique. Photo P. Fluck

Illust 16 – bloc de bauxite des Baux, observé in situ (env. 30 cm). Photo P. Fluck

Illust 17 – scorie fayalitique, fonderie de Saales (VII<sup>e</sup> siècle), 8 x 6 cm, fouilles F. Magar. Photo P. Fluck

Illust 18 – morceau de massicot (5 x 3 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck

Illust 19 – morceau de litharge (4 x 4 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck

Illust 20 – fragment de paroi de four en granite, devenue bulleuse (4 x 4 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck

Illust 21 – résidu métallique stratifié par densité, qui remplissait un bassin d'env 30 cm de diamètre ; section sciée ; fouille de la fonderie de plomb et d'argent de Lauterupt près de Ban-de-Laveline (Lorraine), 1995. Photo P. Fluck

Illust 22 – cristal de zincite (16 cm) en provenance d'un four de Silésie. Photo P. Fluck

Illust 23 – accumulation de tessons de vaisseaux en céramique pour la distillation du mercure, Idrija (Slovénie). Photo P. Fluck

Illust 24 – minéraux des cavités des scories de la fonderie de Vialas (Lozère) : langite (bleue) et anglésite (blanche) au fond d'une vacuole. Photo C. Lheur

Illust 25 – minéraux des cavités des scories de la fonderie de Vialas (Lozère) : la même photo que l'illust. 24, de plus près : on aperçoit de petits cristaux verts de lautenthalite. Photo C. Lheur

Illust 26 – le site de l'Escalette, à Marseille. Photo P. Fluck

Illust 27 – le crassier à scories de la fonderie de Rio Tinto. Photo P. Fluck

Illust 28 – tableau du chimisme des sels. Concept P. Fluck, DAO F.-Florimond Fluck

Illust 29 – l'usine de ciment du Clot del Moro, en Catalogne. Photo P. Fluck

Tableau hors numérotation : organigramme pouvant servir de base de réflexion pour une « minéralogie de l'Anthropocène ».

## ILLUSTRATIONS



Illust 1 – aragonite coralloïde dans une ancienne galerie de mine de l'Altenberg, à Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck





Illust 2 – dans une miniature, statuette de mineur en compagnie d’aragonite coralloïd, dans une vitrine du musée d’Eisenerz, en Styrie. Photo P. Fluck





Illust 3 – concrétionnement de sel dans les installations souterraines d'une mine en Roumanie.  
Photo P. Fluck



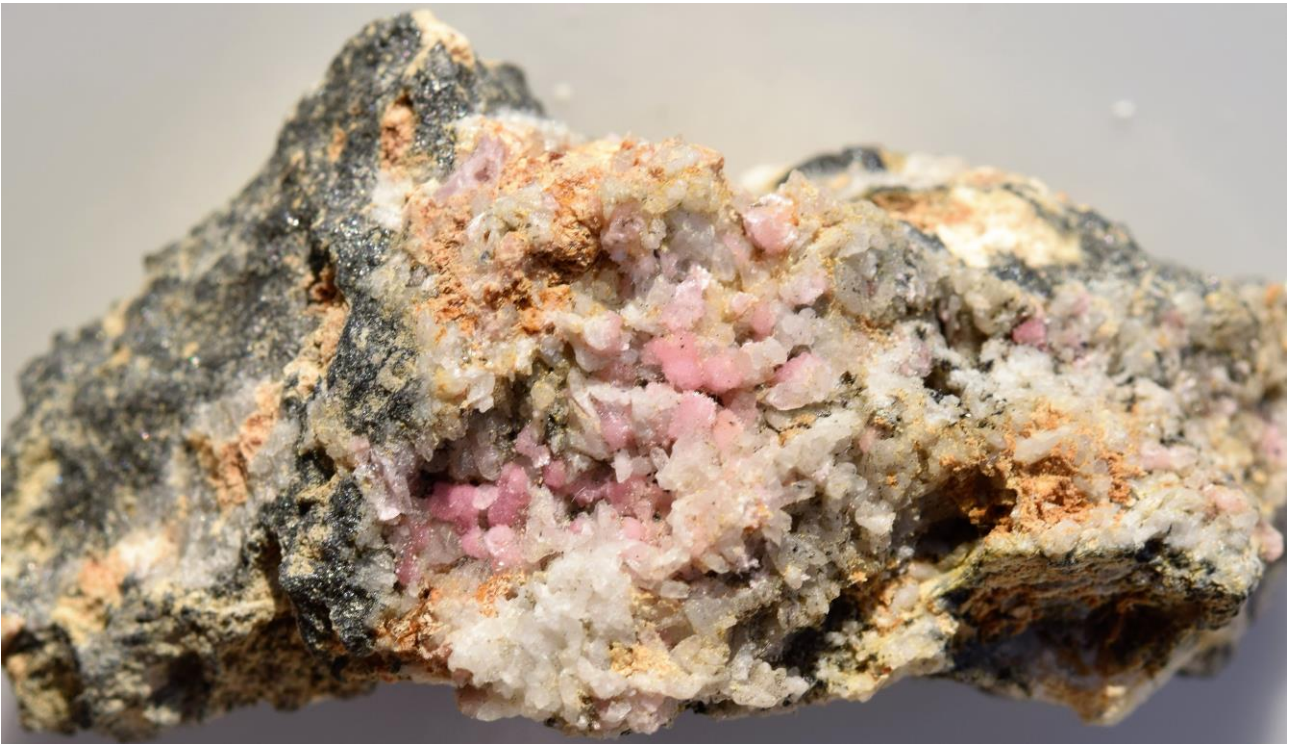


Illust 4 – concrétionnement contenant du sulfate de fer dans le puits de l'Engin, à Grandfontaine (Alsace). Photo H. Bari



Illust 5 – un arséniate : picropharmacolite in situ dans une ancienne galerie de mine du Neuenberg, à Ste-Marie-aux-Mines (remarquer l’insecte pris dans les aiguilles du minéral). Photo P. Fluck





Illust 6 – fluckite sur le quartz à cuivre gris, 5 x 2 cm, mine Giftgrube, Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck



Illust 7 – rauenthalite, 5,5 x 3 cm, Ste-Marie-aux-Mines. Photo P. Fluck





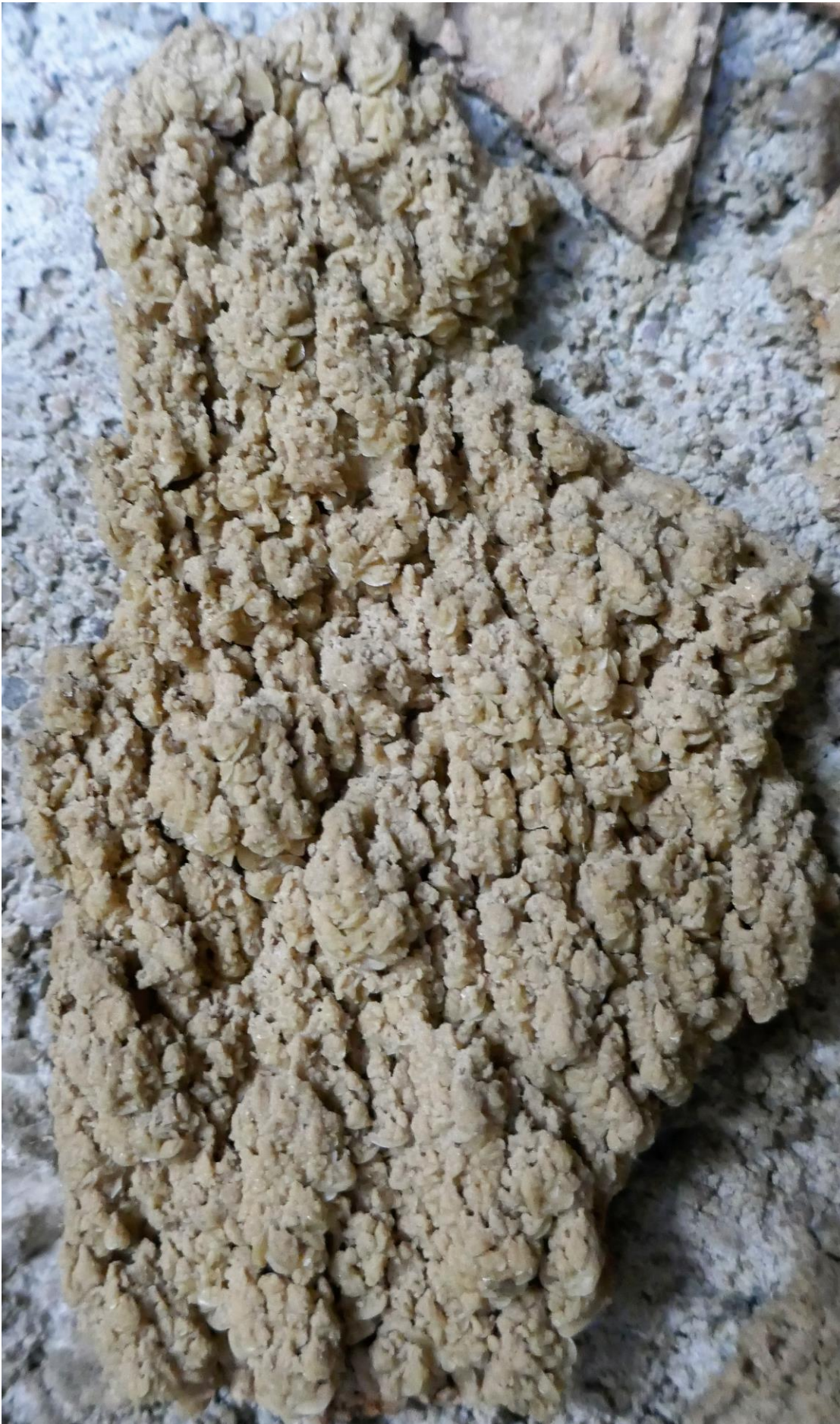
Illust 8 – un géotope : orgues dans les laves rhyolitiques, réserve naturelle de Scandola (Corse).  
Photo P. Fluck





Illust 9 – la paroi de la salle la plus profonde de la tombe de Padiaménopé, nécropole de Thèbes.  
Photo P. Fluck





Illust 10 – tartrate de potassium ou *pierre de vin*. Photo P. Fluck



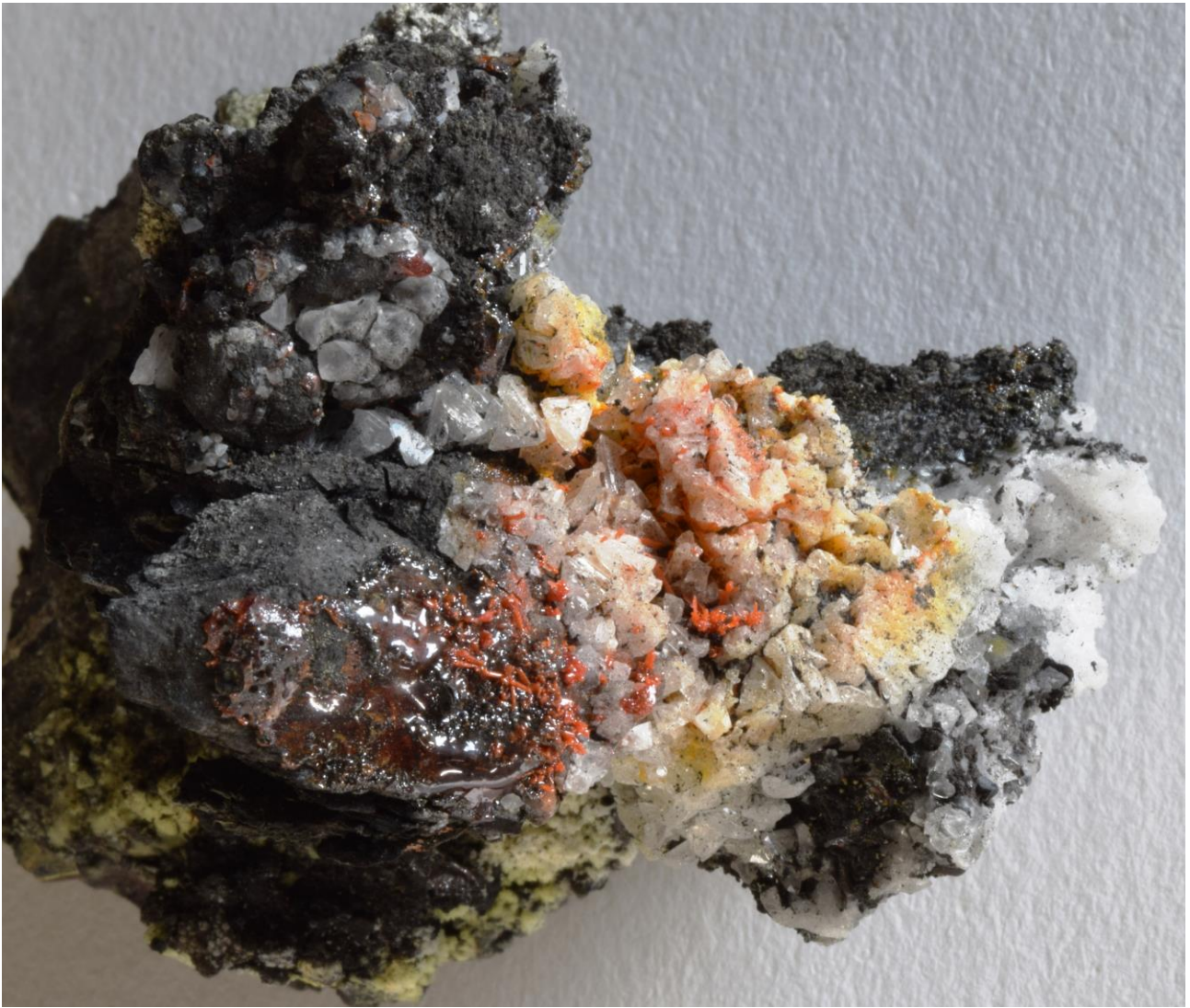


Illust 11 – terril occidental du puits Couriot, à St-Étienne. Remarquer les parties brûlées. Photo P. Fluck



Illust 12 – réalgar (sulfure d'arsenic) en provenance d'un terril de la région de St- Étienne, 4,5 x 3 cm. Photo P. Fluck





Illust 13 – arsénolite (oxyde d'arsenic) en provenance d'un terril de la région de St- Étienne, 6 x 4 cm. Photo P. Fluck





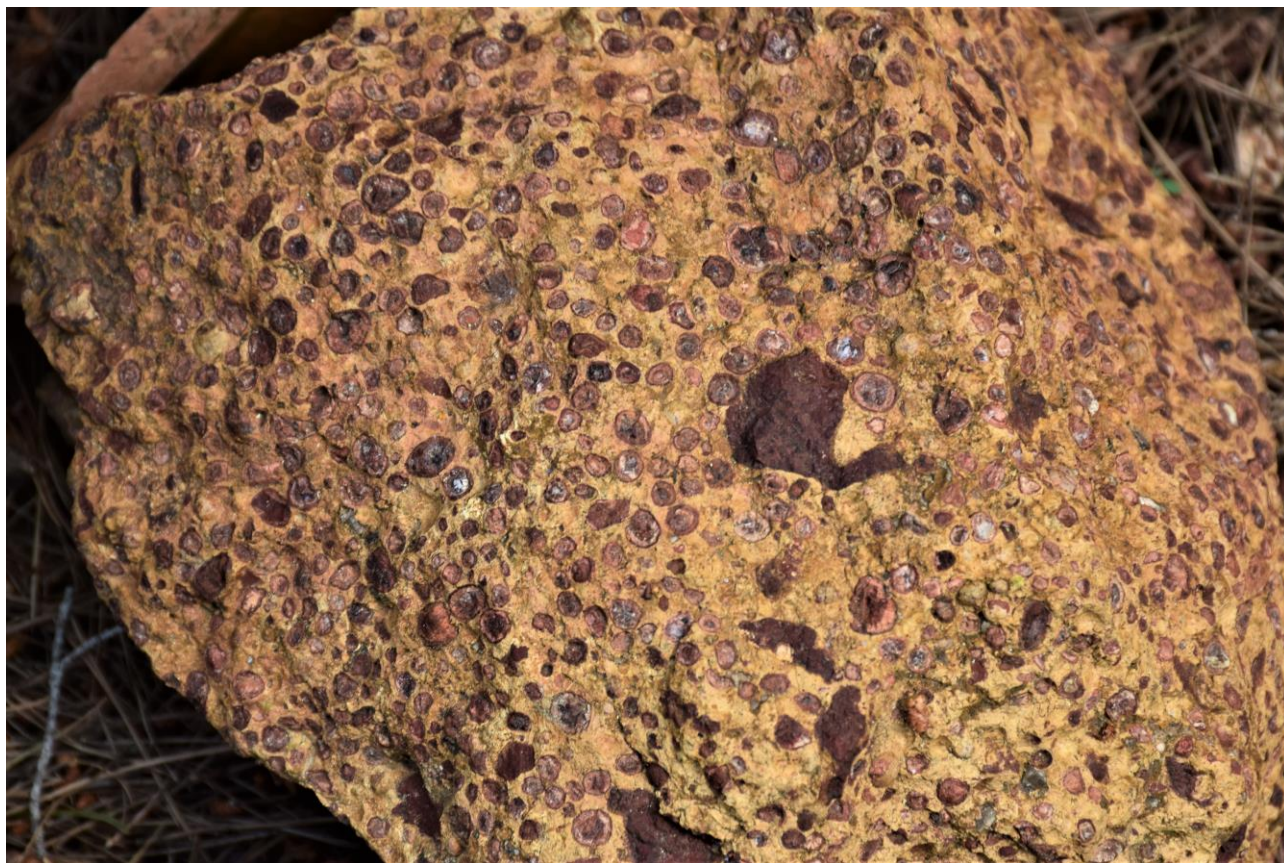
Illust 14 – phénomènes d'érosion dans une halde de résidus de lavages des mines d'argent de Taxco (Mexique). Photo P. Fluck





Illust 15 – le « mille-feuilles » stratifié des résidus de la laverie de la mine Ste-Barbe (fin du XV<sup>e</sup> siècle), à l'Altenberg (Ste-Marie-aux-Mines). Coupe stratigraphique réalisée à l'occasion d'une fouille archéologique. Photo P. Fluck



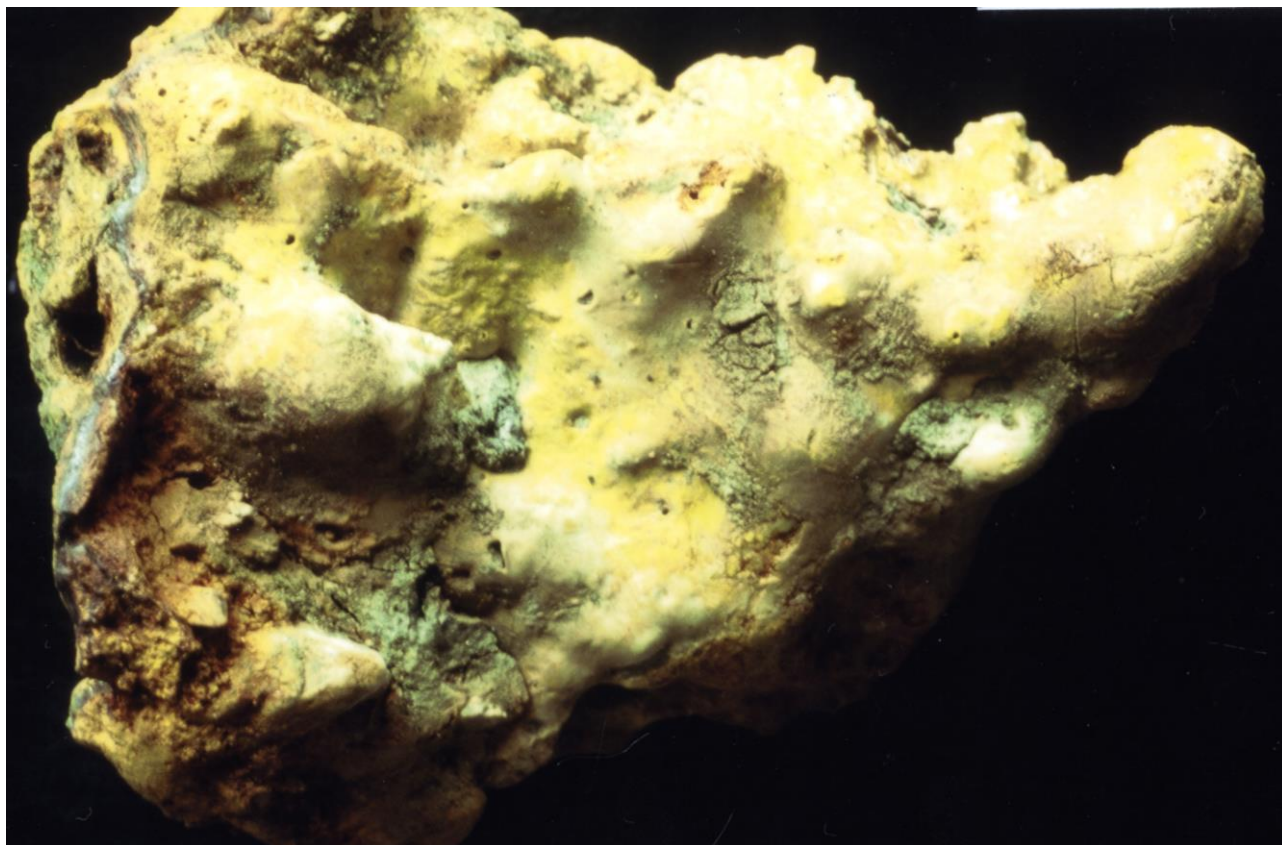


Illust 16 – bloc de bauxite des Baux, observé in situ (env. 30 cm). Photo P. Fluck



Illust 17 – scorie fayalitique, fonderie de Saales (VII<sup>e</sup> siècle), 8 x 6 cm, fouilles F. Magar. Photo P. Fluck





Illust 18 – morceau de massicot (5 x 3 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck



Illust 19 – morceau de litharge (4 x 4 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck





Illust 20 – fragment de paroi de four en granite, devenue bulleuse (4 x 4 cm), fouille de la fonderie de plomb et d'argent du Bonhomme (Alsace), 1994. Photo P. Fluck



Illust 21 – résidu métallique stratifié par densité, qui remplissait un bassin d’env 30 cm de diamètre ; section sciée ; fouille de la fonderie de plomb et d’argent de Lauterupt près de Ban-de-Laveline (Lorraine), 1995. Photo P. Fluck





Illust 22 – cristal de zincite (16 cm) en provenance d'un four de Silésie. Photo P. Fluck



Illust 23 – accumulation de tessons de vaisseaux en céramique pour la distillation du mercure, Idrija (Slovénie). Photo P. Fluck





Illust 24 – minéraux des cavités des scories de la fonderie de Vialas (Lozère) : langite (bleue) et anglésite (blanche) au fond d'une vacuole. Photo C. Lheur



Illust 25 – minéraux des cavités des scories de la fonderie de Vialas (Lozère) : la même photo que l'illust. 24, de plus près : on aperçoit de petits cristaux verts de lautenthalite. Photo C. Lheur





Illust 26 – le site de l'Escalette, à Marseille. Photo P. Fluck



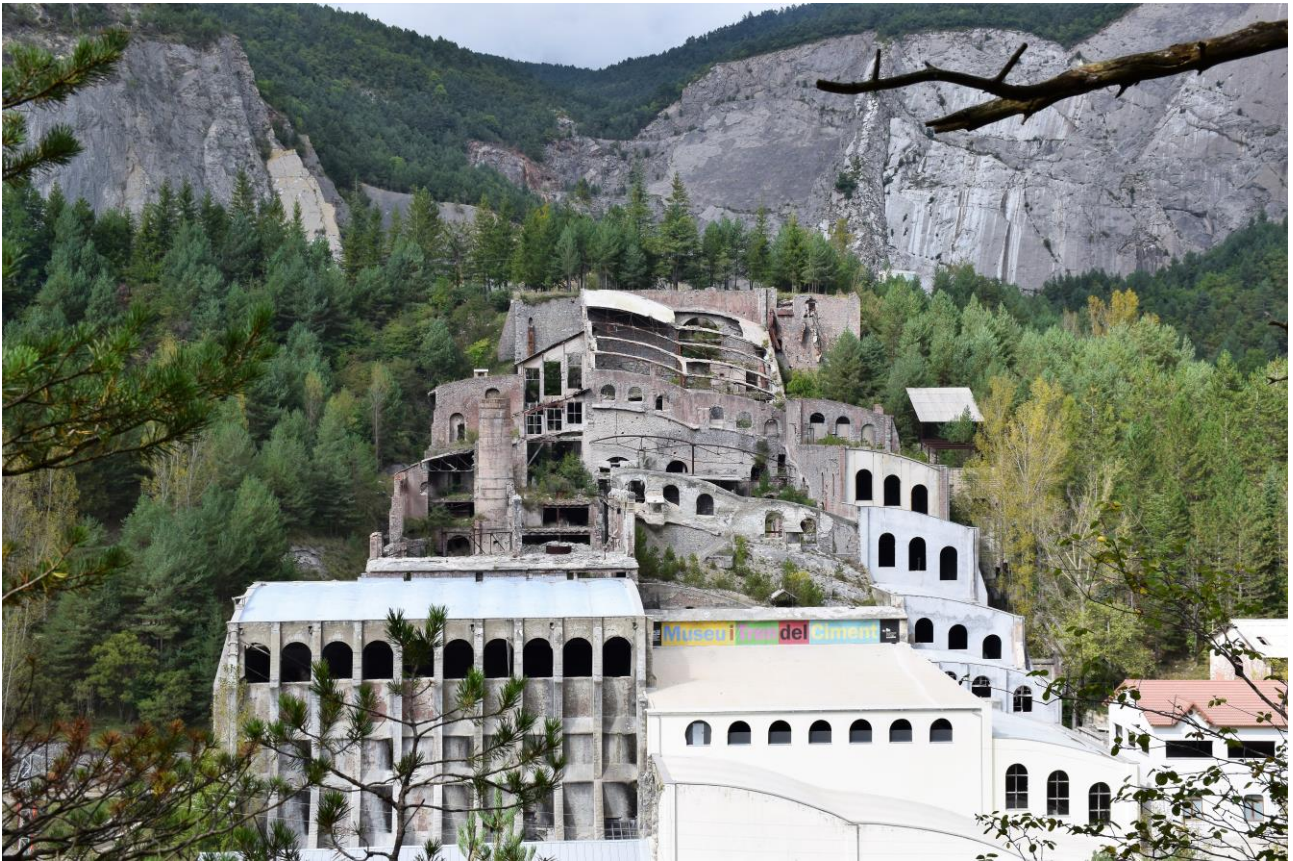


Illust 27 – le crassier à scories de la fonderie de Rio Tinto. Photo P. Fluck

		Cations				
Anions		Ca	Na	K	Al	NH <sub>4</sub>
	Cl		Sel	Potasse (minérale)		Salmiac
	SO <sub>4</sub>	Gypse	Sel de glauber	Alun		
	CO <sub>3</sub>	[Chaux]	[Soude] ou natron	Potasse (végétale)		
	NO <sub>3</sub>	Salpêtre (nitre)		Salpêtre (nitre)		
	BO <sub>4</sub>	Ulexite		Borax		

## Le tableau des sels

Illust 28 – tableau du chimisme des sels. Concept P. Fluck, DAO F.-Florimond Fluck



Illust 29 – l'usine de ciment du Clot del Moro, en Catalogne. Photo P. Fluck



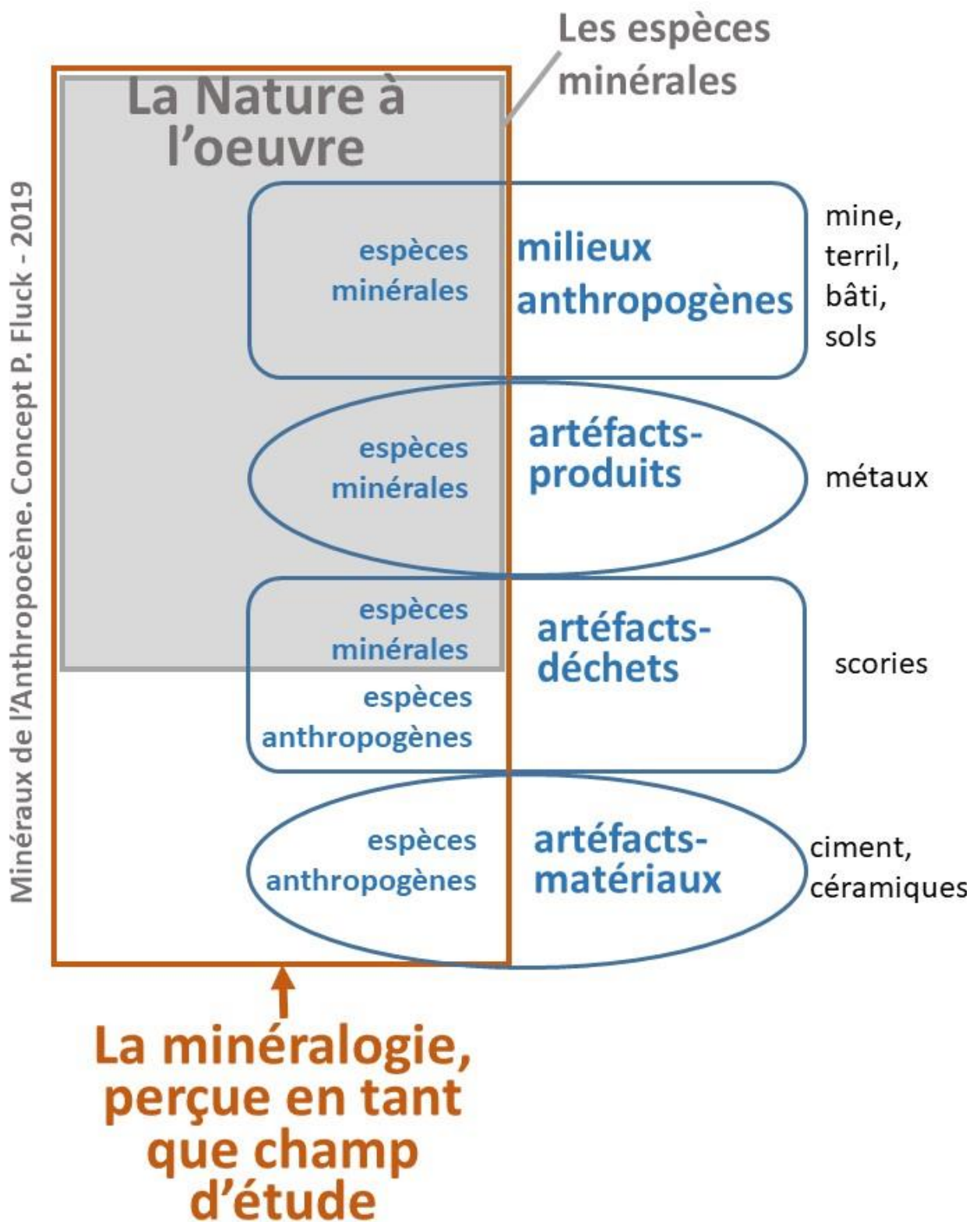


Tableau hors numérotation : organigramme pouvant servir de base de réflexion pour une « minéralogie de l'Anthropocène ».